

# オーロラの3次元計測のための形状変化を考慮した特徴点追跡

竹内 彰<sup>\*1</sup>, 藤井 浩光<sup>\*2</sup>, 山下 淳<sup>\*2</sup>, 田中 正行<sup>\*3</sup>, 片岡 龍峰<sup>\*4</sup>, 三好 由純<sup>\*5</sup>,  
奥富 正敏<sup>\*3</sup>, 浅間 一<sup>\*2</sup>

## Feature Point Tracking Considering Shape Change for Aurora 3D-Measurement

Akira Takeuchi<sup>\*1</sup>, Hiromitsu Fujii<sup>\*2</sup>, Atsushi Yamashita<sup>\*2</sup>,  
Masayuki Tanaka<sup>\*3</sup>, Ryuho Kataoka<sup>\*4</sup>, Yoshizumi Miyoshi<sup>\*5</sup>,  
Masatoshi Okutomi<sup>\*3</sup> and Hajime Asama<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> <sup>\*2</sup> Department of Precision Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

<sup>\*3</sup> Department of Mechanical and Control Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

<sup>\*4</sup> National Institute of Polar Research  
10-3 Midori-cho, Tachikawa-shi, Tokyo 190-8518, Japan

<sup>\*5</sup> Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University  
Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Three-dimensional analysis of aurora is important for the research of solar wind and magnetic storms, because aurora reflects the relationship between solar wind and terrestrial magnetism. Therefore a method to reconstruct a three-dimensional shape of aurora precisely is demanded. In this paper, a method using template matching and SIFT to detect feature points from two fish-eye images is proposed. Moreover, a feature point tracking between two images continuing in time is performed to improve precision of the feature point detection. Then the three-dimensional coordinates of feature points are calculated by triangulation, aurora shape is visualized as point cloud.

**Key Words** : Aurora 3D-Measurement, Fish-eye stereo camera, Template matching

## 1. 序 論

オーロラとは、太陽より放出されたプラズマ粒子が地球の磁力線に沿って極地付近に流入し、大気中の原子と衝突することによって起きる発光現象である。そのためオーロラの色や形状、分布する高度は太陽由来のプラズマのエネルギー分布や磁気嵐といった現象と大きく関係している。太陽風や磁気嵐は、現在世界的に欠かせないものとなっているGPSや人工衛星を用いた通信に直接的な悪影響を及ぼす。したがって、オーロラの形状を正確に計測することはそれら現象の影響を明らかにすることに繋がるため非常に重要である。

オーロラを計測しようとする試みは、様々な方法を用いてこれまでも行われてきた<sup>(1)(2)(3)</sup>。しかしオー

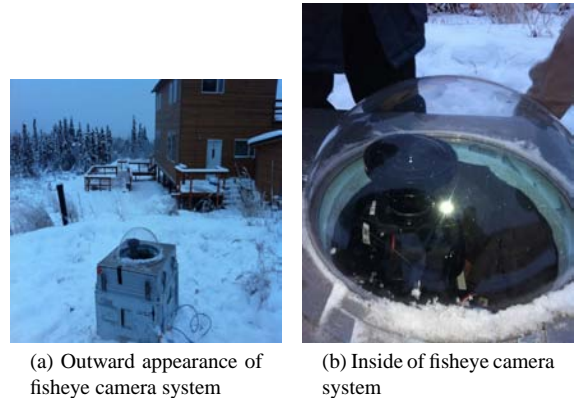


Fig. 1 Fisheye camera system

ロラは発生時刻や発生場所が一定ではない点や、変化が不規則で連続的ではないという点から地上から正確な計測を行うことは非常に困難である。そこでロケットなどを用いた宇宙空間からの計測がなされているが<sup>(4)(5)</sup>、恒常的に計測することは難しい。

これらの問題点に対して、我々の研究グループは地上に設置され恒常的に空を撮影する2台の魚眼ステ

<sup>\*1</sup> 東京大学工学部精密工学科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) takeuchi@robot.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>\*2</sup> 東京大学工学系研究科精密工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

<sup>\*3</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>\*4</sup> 国立極地研究所 (〒 190-8518 東京都立川市緑町 10-3)

<sup>\*5</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所 (〒 464-8601 愛知県名古屋市中種区不老町名古屋大学太陽地球環境研究所)

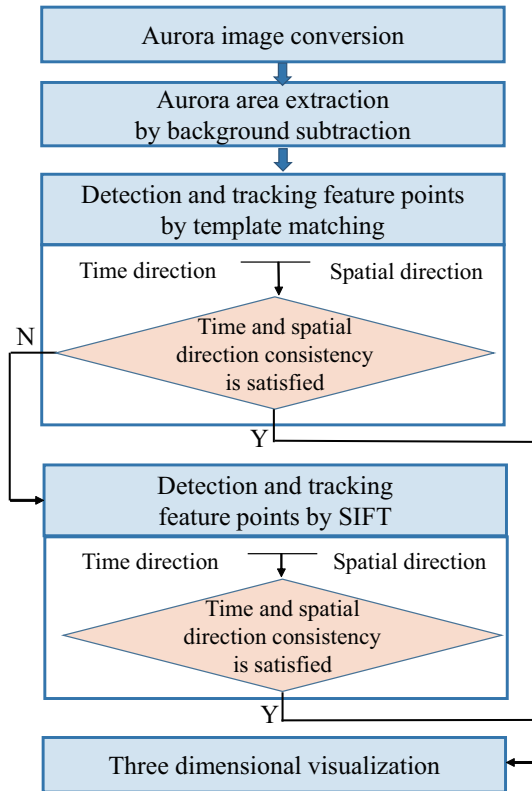


Fig. 2 Flow chart of the proposal method

レオカメラを用いてオーロラを測定するという研究を行ってきた<sup>(6)(7)(8)(9)</sup>。設置された魚眼カメラを図1に示す。恒常的に撮影する魚眼カメラを用いることで、連続的に変化するオーロラの画像対を取得できる。得られた画像対に対して、SIFT マッチングを用いて特徴点を抽出することにより、3次元形状の計測、復元を行った<sup>(8)(9)</sup>。

しかしこの研究では、連続するフレーム間のオーロラ形状同士の関係を考慮していないため、復元されたオーロラの3次元形状は連続するフレーム間で大きく異なる。実際のオーロラは時間経過による形状変化に連続性があるため、この研究では正確に形状を計測できているとは言い難い。

この問題を解決するために本研究では、フレーム間の形状変化を考慮することでより精度の高い計測を目的とする。同時刻間の画像対のみで特徴点を検出するのではなく、連続する時刻の画像間で類似する箇所を検出し整合性をとることで正確な特徴点検出を行う。

## 2. 提案手法

本研究における提案手法のフロー図を図2に示す。以下詳細に提案手法を説明する。

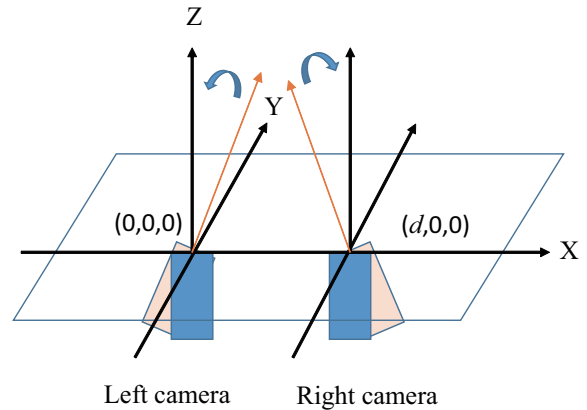
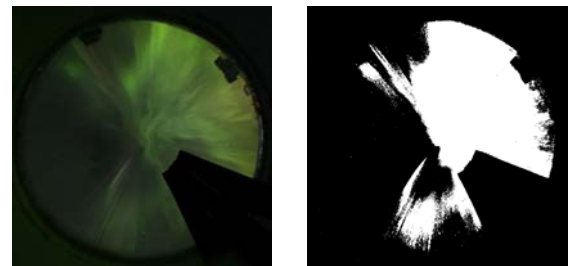


Fig. 3 Observation coordinate system



(a)Original image

(b)Foreground image

Fig. 4 Background subtraction

**2.1 画像変換** まず Fujii ら<sup>(9)</sup>と同様の方法により、撮影されたオーロラ画像をリクティブアイド座標系に変換し、魚眼レンズによる歪みを補正する。変換された座標系を図3に示す。図3において赤い矢印で表されている軸が、設置されたカメラの座標変換前の光軸であり、黒い矢印で表されている軸が座標変換後の座標軸である。これによって2台のカメラは平行ステレオペアとなる。図3で示すような座標系をとるとき、左側にあるカメラを左カメラ、右側にあるカメラを右カメラと定義し、以下この名称を用いて説明することとする。

**2.2 背景差分によるオーロラ領域の抽出** オーロラは特徴点が少なく検出することが困難な被写体である。そのため、星などの特徴的な点が探索範囲の付近にある場合、検出結果が星の位置に大きく影響を受け誤検出を招く可能性が高まる。これは正確な特徴点検出を目的にするにあたり大きな問題である。

このことから本研究では、特徴点を検出するにあたり前処理として背景差分の手法を用いることで特徴的な背景を除く。特徴点を探索する画像と、同地点で撮影されオーロラが写っていない画像との差分を抽出する。図4は背景差分の処理を行った図である。図4(a)

が原画像、図 4(b) が差分処理を行った後の画像を示しており、白い領域が抽出された領域である。星は時刻によって位置を変えるため、この時点では抽出された領域にオーロラだけでなく星も含まれる。しかし星の 1 つ 1 つは画像中において極めて小さいため、後述するテンプレートマッチングの際にテンプレートの全てが前景領域に含まれる時のみ探索を行うという制限を加えることで星を排除することができる。背景差分の手法としては Benzeth ら<sup>(10)</sup>の手法を用いた。

図 4(b) における前景領域のみで特徴点を探索することで、オーロラ以外の外的な影響を受けずに特徴点探索を行うことができる。また加えて、画像対において前景の共通部分のみを探索することによって探索領域が減少し処理時間の削減を図ることができる。

**2.3 テンプレートマッチングによる対応点検出**  
Fujii ら<sup>(9)</sup>の手法では、画像の回転や拡大・縮小に頑健な特性を持つ SIFT マッチングのみを用いて特徴点を検出し、同時刻に撮影された画像間において特徴量の近い点同士を対応付ける。しかし同時刻に撮影された画像間では、カメラが並行なペアであることや同一の被写体を撮影していることから、回転や拡大・縮小を考慮する必要はない。むしろ回転や拡大・縮小も考慮できる SIFT を用いることで誤検出を招く恐れがある。

対してテンプレートマッチングは、一方の画像からある領域を抽出し、その領域をテンプレートとしてもう一方の画像中からテンプレートに類似した箇所を探索する。そのため画像の回転や拡大・縮小などの変化があると対応付けされない。つまり形状に違いのない画像間においては、テンプレートマッチングのみを用いることでより正確な対応点の検出が行える。更にこの手法では画像中の点同士を比較するのではなく、抽出した領域同士の類似性を領域全体で総合的に判断するため、オーロラのような特徴点が少ない画像間であっても対応する領域を数多く抽出することが見込める。これらのことからテンプレートマッチングは同時刻のオーロラ画像間の対応点検出に非常に有効な手法である。本手法では対応付けされた領域同士の中心の点を代表してそれぞれ特徴点と定義した。

本手法ではテンプレートマッチングを行う上での類似性の評価指標として、オーロラ画像全体の明るさが変化してもオーロラの模様で類似性を評価できるよう、画像の輝度値の変化に強いという特徴を持つ ZNCC (正規化相互相関) を用いる。また、テンプレートのサイズは一定とした。

本研究に用いられる 2 台のカメラは図 3 で示したように平行ステレオペアとなっているため、得られた画

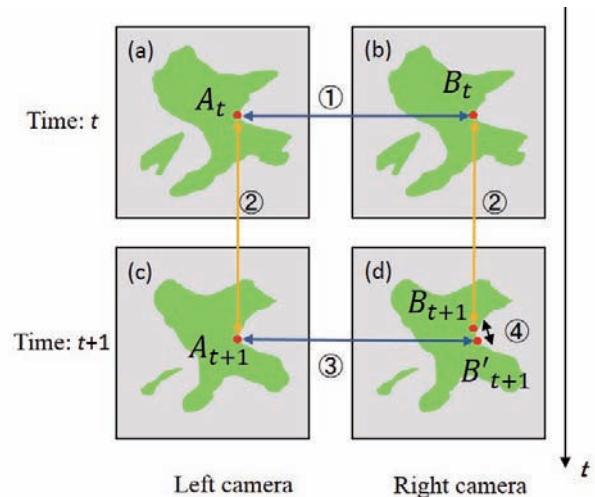


Fig. 5 Tracking method of the feature point

像間でエピソード拘束が成り立つ。そのためエピソード拘束を利用しマッチングの探索範囲を限定する。探索範囲を限定することによって効率的に整合性のとれた特徴点検出を行う。

**2.4 特徴点追跡** オーロラは絶えず動きのある現象であるため、連続するフレーム間であっても特徴点が消失・出現する可能性があり追跡は容易ではない。しかし時間経過によるオーロラの形状変化には連続性があることから連続するフレーム間のオーロラ画像には類似性があると考えられる。そこで本研究では時間経過によるオーロラの形状変化とその類似性を利用して特徴点を追跡し、より正確な 3 次元形状の復元を狙う。

まずテンプレートマッチングを用いて特徴点の追跡を行う。フレーム間で変化の少ない部分は、フレームの前後で類似した形状をしているためテンプレートマッチングにより追跡が可能である。時刻  $t$  における特徴点が時刻  $t+1$  において追跡可能であった場合、時刻  $t+1$  においてもその点は特徴点である。これを利用して時刻  $t+1$  における空間方向の特徴点検出の正当性を評価することによって、より正確な特徴点検出を行う。

逆にテンプレートマッチングにより追跡不可能な部分は、オーロラ形状が大きく変化した、または形状が回転や拡大・縮小したと判断できる。オーロラは類似した形状をしていても回転や拡大・縮小している可能性がある。そこで我々の研究グループが行ってきた研究<sup>(8)(9)</sup>の先行知見を基に、時間方向での対応点検出には回転や拡大・縮小変化に頑健な SIFT を併用する。テンプレートマッチングによって追跡されなかった点に対して SIFT マッチングによる追跡を行う。時刻  $t$  に

おける特徴点が SIFT によって追跡可能であった場合、時刻  $t+1$  においてその点は特徴点であると判断でき、追跡できなかった場合その点は時刻  $t+1$  においては特徴点でないと判断できる。これらの処理によってより正確な特徴点検出が可能になる。

**2.4.1 テンプレートマッチングによる特徴点追跡**  
テンプレートマッチングによる特徴点追跡によって、時間経過による形状変化が少なく、回転や大きさの変化がない箇所を探索する。本研究では、追跡可能性の判断においても ZNCC における類似性の評価によって判断する。ZNCC による類似性の評価が高い場合、テンプレートに類似した箇所が探索できたとし追跡可能であると判断する。

テンプレートマッチングによる特徴点の追跡手法を図 5 に示す。図 5 の (a), (b) は時刻  $t$ , (c), (d) は時刻  $t+1$  に撮影されたオーロラ画像を示す。また (a), (c) は左カメラ, (b), (d) は右カメラによって撮影されたオーロラ画像を意味している。それぞれ緑の模様はオーロラを表している。特徴点の追跡と整合性の評価は図 5 内に示された番号の順番に従って行われる。

- ① 時刻  $t$  における空間方向の特徴点検出  
同時刻  $t$  に撮影された画像間で特徴点を検出する。対応する特徴点を  $A_t, B_t$  とする。
- ② 時間方向の特徴点検出  
特徴点  $A_t, B_t$  に対応する特徴点をそれぞれ時刻  $t+1$  の画像から検出する。検出された場合、 $A_t, B_t$  に対応する特徴点を  $A_{t+1}, B_{t+1}$  とする。検出されない場合、形状が大きく変わったと判断し、追跡を終える。
- ③ 時刻  $t+1$  における空間方向の特徴点検出  
時刻  $t+1$  で特徴点  $A_{t+1}$  に対応する特徴点  $B'_{t+1}$  を探索する。
- ④ 追跡可能性の判断  
特徴点  $B_{t+1}$  と  $B'_{t+1}$  の画像中の距離を比較する。テンプレートマッチングに使用したテンプレートの大きさよりも画像中で距離が小さい場合、ほぼ同じ部分を表しているとし  $B'_{t+1}$  を正しい特徴点とする。反対に画像中の距離が大きい場合、整合性がとれていないため  $B'_{t+1}$  は正しい特徴点ではないと判断し特徴点に加えない。

以降、手順 1~4 を各時刻で行い特徴点の検出、追跡を続けることにより各時刻における対応する点群が抽出される。

**2.4.2 SIFT マッチングによる特徴点追跡**  
テンプレートマッチングによって追跡されなかった点に対して SIFT による追跡を行うことで、回転や大きさの

変化はあるが形状変化の少ない箇所の探索を行う。まずテンプレートマッチングによる追跡がなされなかった時刻  $t$  の点の SIFT 特徴量を抽出する。次に時刻  $t+1$  の画像から、抽出した特徴量に最も近い特徴量を持つ点を探索する。そしてテンプレートマッチングによる追跡同様、時刻  $t+1$  の画像間で SIFT による特徴点の対応付けを行い整合性をとる。整合性がとれた場合、特徴点は追跡されたとする。また、テンプレートマッチング同様にエピポラ拘束を利用して探索範囲を限定することで効率的な検出を行う。

**2.5 3次元可視化**  
特徴点の検出、追跡を行うことによって同時刻の画像間で互いに対応する特徴点群を得る。それらを用いて全ての特徴点の 3次元座標を計算し、その座標に点をプロットすることでオーロラの 3次元形状を可視化する。プロットする点の色はそれぞれ、3次元座標を求めるために用いた 1 対の特徴点のうち、左カメラによって撮影された入力画像の特徴点の座標の色を使用する。

### 3. 実験

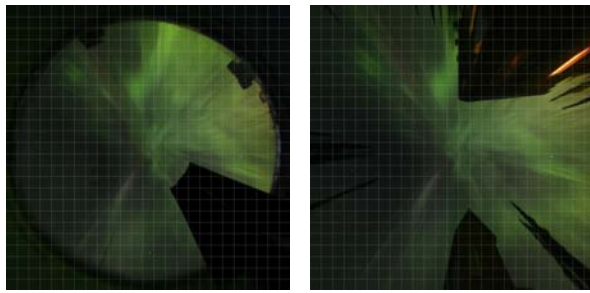
**3.1 実験環境**  
本研究では撮影に図 1 で示した魚眼カメラを用いた。図 1 のように地上に設置され天頂方向に向けられた 2 台の魚眼ステレオカメラによって撮影された画像対を入力画像として使用した。2 台のカメラはアラスカ州のフェアバンクスにカメラ間隔 8.1km で設置されており、撮影は 10 秒間隔で行われた。

**3.2 同時刻画像間の特徴点検出**  
テンプレートマッチングによる、同時刻間の特徴点検出の結果を図 6 に示す。図 6(a), 図 6(b) はそれぞれ特徴点検出を行う前の入力画像である。同時刻画像間図 6(a), 図 6(b) に対してテンプレートマッチングを行い、検出した特徴点を赤くプロットした画像がそれぞれ図 6(c), 図 6(d) である。入力画像と出力結果を比較すると、オーロラの模様の類似している部分に赤い点がプロットされ、オーロラのない領域にはプロットされていないことが確認できる。

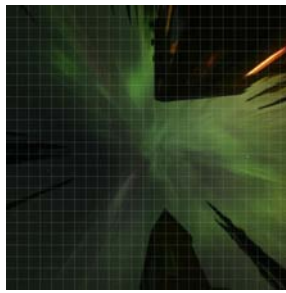
#### 3.3 特徴点追跡

**3.3.1 テンプレートマッチングによる特徴点追跡**  
テンプレートマッチングによって特徴点追跡を行った結果を図 7 に示す。図 7(a), 図 7(b) はそれぞれ、同時刻間で特徴点検出を行った結果であり、特徴点追跡前の画像である。図 7(c), 7(d) はそれぞれ図 7(a) と図 7(b) の全ての特徴点に関して、特徴点追跡と整合性の評価を行った結果である。図 7 の全ての画像においても赤い点は特徴点を表している。

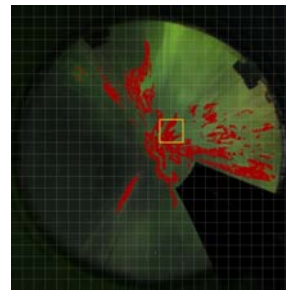
特徴点追跡の結果の傾向を表した図を図 8 に示す。



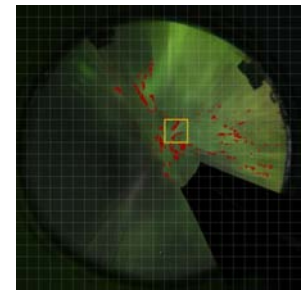
(a) Input image of left camera



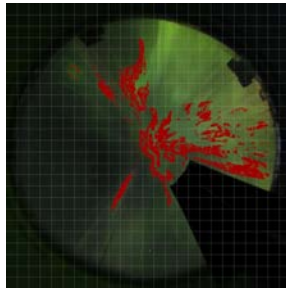
(b) Input image of right camera



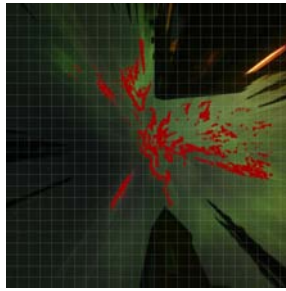
(a) Image before feature point tracking



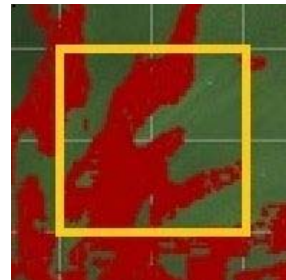
(b) Image after feature point tracking



(c) Output image of left camera



(d) Output image of right camera

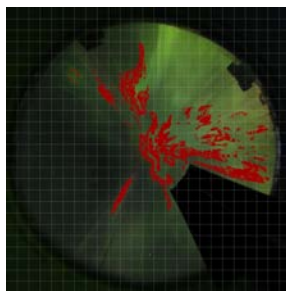


(c) Enlarged image before feature point tracking

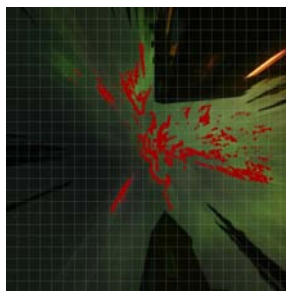


(d) Enlarged image after feature point tracking

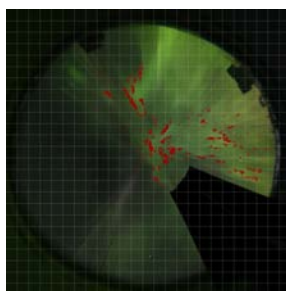
Fig. 6 Results of feature point detection from images at the same time



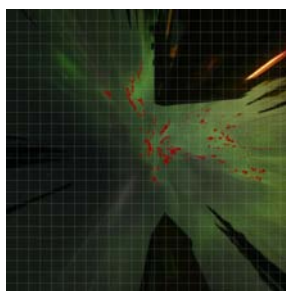
(a) Image of left camera before feature point tracking



(b) Image of right camera before feature point tracking



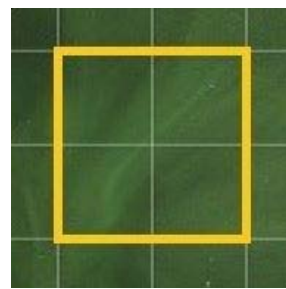
(c) Image of left camera after feature point tracking



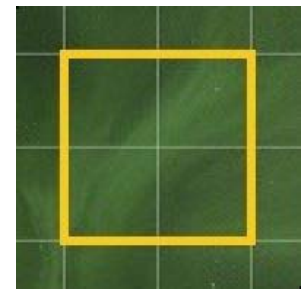
(d) Image of right camera after feature point tracking

Fig. 7 Results of feature point tracking

図 8(a), 図 8(b) はそれぞれ特徴点追跡前, 追跡後の画像である。また図 8(a), 図 8(b) 中の黄色い四角の部分を拡大した図が図 8(c), 図 8(d) であり, 赤い点を除いたものを図 8(e), 図 8(f) に示した。これらを比較する



(e) Background of enlarged image before feature point tracking



(f) Background of enlarged image after feature point tracking

Fig. 8 Tendency of feature point tracking by using template matching

と, 時間経過によるオーロラの変化が少なく模様の種類が類似している部分のみが赤くなっており, 変化の大きい部分では追跡を終了できていることが確認できる。

**3.3.2 SIFT マッチングによる特徴点追跡** SIFT マッチングによる特徴点追跡結果を図 9 に示す。図 9(a) はテンプレートマッチングによって追跡されなかった時刻  $t$  の点群のうち, SIFT によって追跡可能と判断される点を赤い点によって表した図である。また図 9(b) は, 図 9(a) の点群を SIFT によって追跡した結果の, 時刻  $t+1$  における点群を黄色の点で表している。図 9(c), 図 9(d) は図 9(a), 図 9(b) 中の青い四角を拡大した図であり, 図 9(e), 図 9(f) は点を除いた図である。これらを見比べると, 図 9(c) の青い四角中の模様が図 9(f) 中では傾いていることが確認できる。形状の傾きの変化

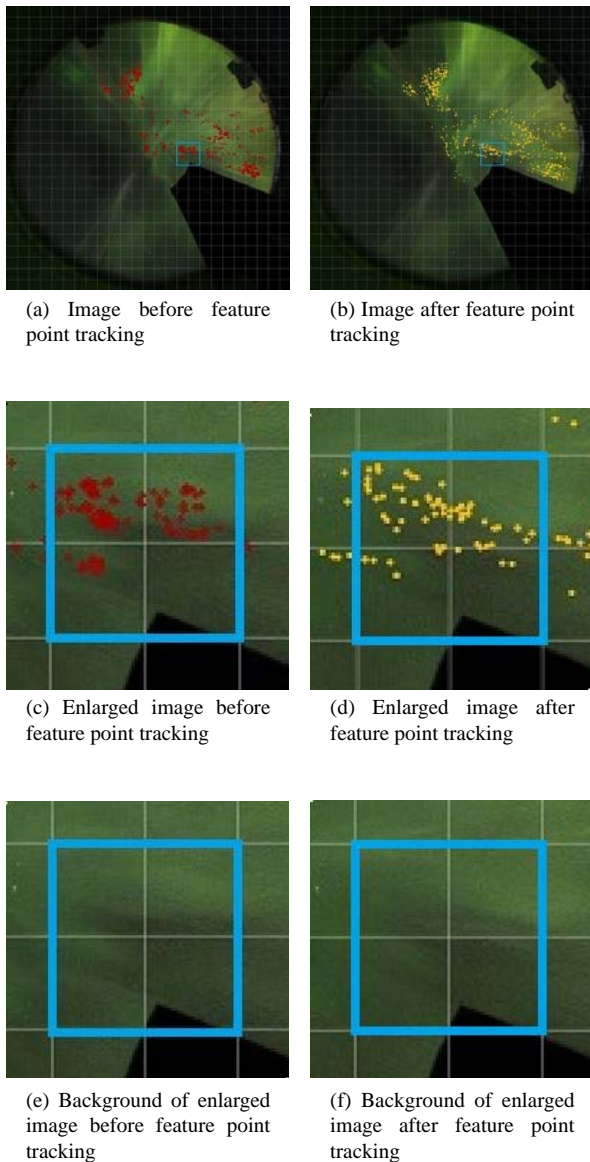


Fig. 9 Tendency of feature point tracking by using SIFT

があっても図9(c)中の赤い点が追跡され図9(d)中で黄色くプロットされている。これにより形状が回転変化しても類似した箇所を追跡できることが確認された。

**3.4 オーロラの3次元可視化** 入力画像図6(a), 図6(b)に対してテンプレートマッチング, SIFT マッチングを用いて特徴点検出, 追跡を行うことによって互いに対応する特徴点群を得る。それらを用いてオーロラの3次元形状を可視化した結果を図10, 図11に示す。図10が時刻 $t$ , 図11が時刻 $t+1$ の3次元形状を表している。いずれの図も(a)がオーロラを上方から見た図, (b)がオーロラを側面から見た図となっている。これらの結果における形状の類似性から, 連続するフレーム間でオーロラの形状が連続的に変化していることが確認できた。

## 4. 結 論

本研究では, 背景差分, テンプレートマッチング, SIFT マッチングを異なるカメラ画像間と連続する時刻間画像に対して適用することによる, 特徴点検出, 追跡の手法を提案した。本手法を用いることで特徴の少ないオーロラ画像からより密な特徴点を得られるのみならず, 時間経過による形状変化が考慮されたより精密な特徴点検出が可能である。それにより, 正確な3次元形状を測定できた。

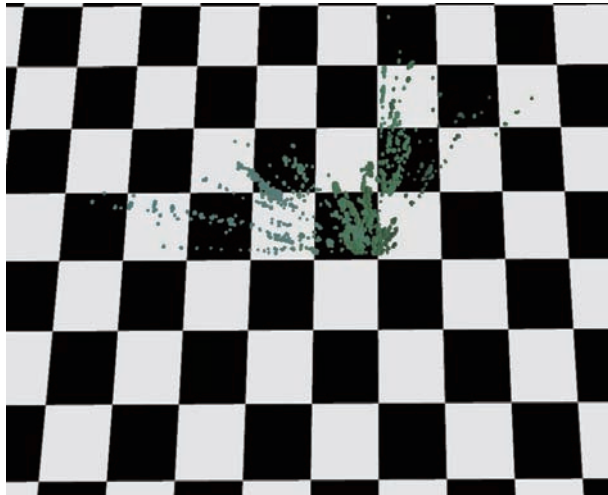
本研究では2台の魚眼ステレオカメラによって得られた画像対を用いて形状測定を行ったが, 2台のカメラのみでは構造を完全に確認し計測することは困難であると考えられる。したがって今後の展望としてカメラ台数を増やした計測を行うことが挙げられる。また, それに伴い大量のデータを扱うための処理, 手法の効率化は今後の課題である。

## 謝 辞

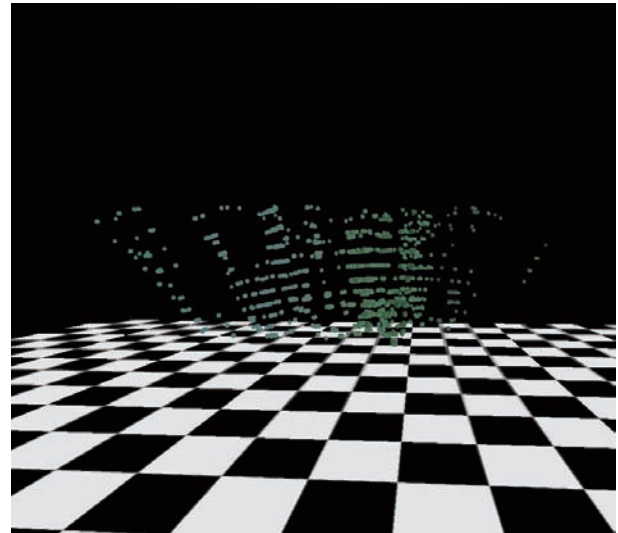
本研究の一部は, 科費挑戦的萌芽 25540114 および財団法人旭硝子の援助を受けた。

## 参 考 文 献

- (1) Yoshimasa Tanaka, Takahiko Aso, Bjorn Gustavsson, Kunio Tanabe, Yasunobu Ogawa, Akira Kadokura, Hiroshi Miyaoka, Tima Sergienko, Urban Brandstrom and Ingrid Sandahl, "Feasibility study on Generalized-Aurora Computed Tomography", *Annales Geophysicae*, Vol. 29, (2011), pp. 551–562.
- (2) Takehiko Aso, Masayuki Ejiri, Akira Urashima, Hiroshi Miyaoka, Ake Steen, Urban Brandstorm and Bjorn Gustavsson, "First Results of Auroral Tomography from ALIS-Japan Multi-station Observations in March, 1995", *Earth Planets Space*, Vol. 50, (1998), pp. 81–86.
- (3) Hans Stenbaek-Nielsen and Thomas Hallinan, "Pulsating Auroras: Evidence for Noncollisional Thermalization of Precipitating Electrons", *Space Physics*, Vol. 84, (1979), issue A7, pp. 3257–3271.
- (4) Yukio Nishimura, Jacob Bortnik, Wen Li, Richard Thome, Larry Lyons, Vassilis Angelopoulos, Stephen Mende, John Bonnell, Olivier Le Contel, Christopher Cully, Robert Ergun and Hans-Ulrich Auster, "Identifying the Driver of Pulsating Aurora", *Science*, Vol. 330, (2010), pp. 81–84.
- (5) William Sharp, "Rocket-Borne Spectroscopic Measurements in the Ultraviolet Aurora: Nitrogen Vegard-Kaplan Bands", *Journal of Geophysical Research*, ISSN 1530–1834, (1971), pp. 987–1005.
- (6) Yoshiki Mori, Atsushi Yamashita, Masayuki Tanaka, Ryuho Kataoka, Yoshizumi Miyoshi, Toru Kaneko, Masatoshi Okutomi, Hajime Asama, "Calibration of Fish-Eye Stereo Camera for Aurora Observation", *Proceeding*

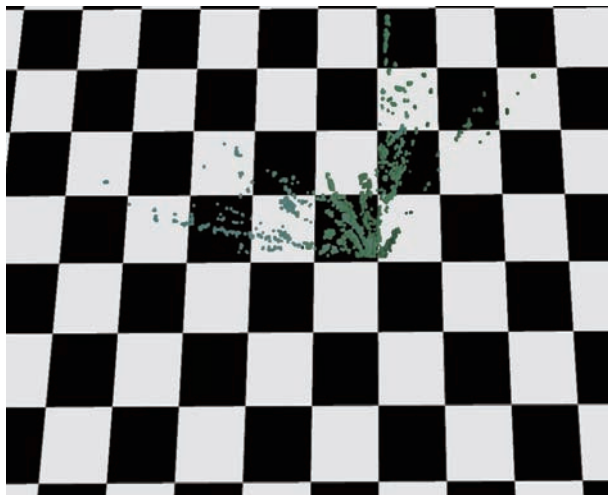


(a) Aurora shape as seen from above

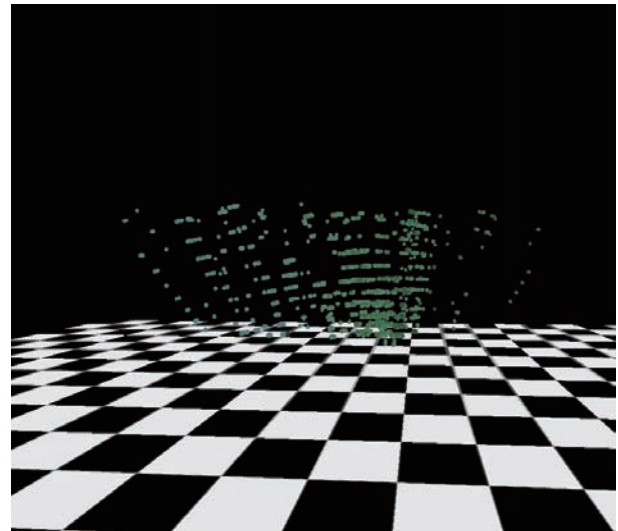


(b) Aurora shape as seen from side

Fig. 10 Aurora shape at time  $t$



(a) Aurora shape as seen from above



(b) Aurora shape as seen from side

Fig. 11 Aurora shape at time  $t+1$

of the International Workshop on Advanced Image Technology 2013 (IWAIT2013), (2013), pp. 729–734.

- (7) Ryuho Kataoka, Yoshizumi Miyoshi, Kai Shigematsu, Donald Hampton, Yoshiki Mori, Takayuki Kubo, Atsushi Yamashita, Masayuki Tanaka, Toshiyuki Takahei, Taro Nakai, Hiroko Miyahara, Kazuo Shiokawa, “Stereoscopic Determination of All-sky Altitude Map of Aurora Using Two Ground-based Nikon DSLR Cameras”, *Annales Geophysicae*, Vol. 31, No. 9, (2013), pp. 1543–1548.
- (8) 久保 堯之, 山下 淳, 藤井 浩光, 田中 正行, 片岡 龍峰, 三好 由純, 奥富 正敏, 浅間 一, “魚眼ステレオカメラで取得したオーロラ動画の3次元計測と可視化”, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2014), pp. 985–986.
- (9) Hiromitsu Fujii, Takayuki Kubo, Atsushi Yamashita, Akira Takeuchi, Masayuki Tanaka, Ryuho Kataoka, Yoshizumi Miyoshi, Masatoshi Okutomi, Hajime Asama, “Aurora 3D-Measurement and Visualization Using Fish-

Eye Stereo Camera”, *Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2014 Posters*, Article Np.24, (2014).

- (10) Yannick Benezeth, Pierre-Marc Jodoin, Bruno Emile, Helene Laurent, Christophe Rosenberger, “Review and Evaluation of Commonly-Implemented Background Subtraction Algorithms”, *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, (2008), pp. 1–4.